

3

Satellite Communication Systems

Overview

3.1. Introduction to satellite communication systems

- 3.1.1. Services, frequency bands and applications
- 3.1.2. Elements of a satellite communication system
- 3.1.3. Example: ARTEMIS satellite (ESA)
- 3.1.4. Orbits

3.2 Link budget

- 3.2.1. Link equation
- 3.2.2. Atmospheric effects
- 3.2.3. Link performance estimation

3.3. Transponder Capacity Sizing

3.3. Broadband Satellite Systems

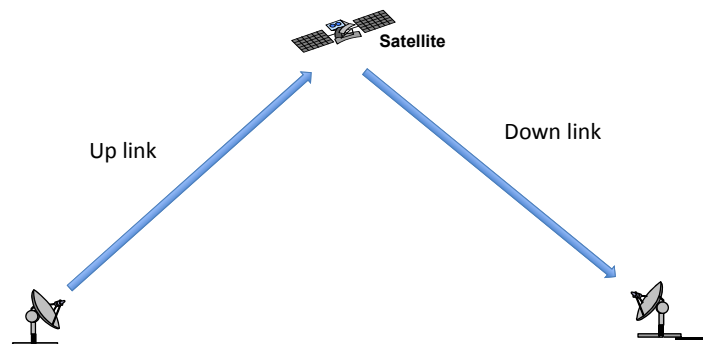
CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

UPM



3.2. Link budget



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

5

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

UPM



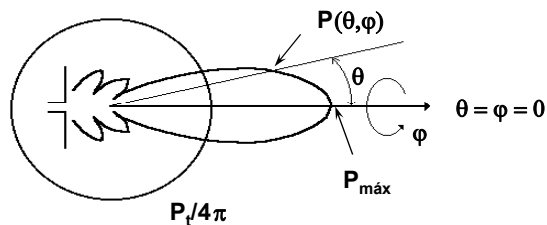
Diagrama y Ganancia

Representación de la intensidad de radiación en cada dirección.

Una antena **isótropa** radia una onda esférica con una potencia uniforme $P_t/4\pi$ en cualquier dirección (θ, φ) del espacio.

P_t es la potencia entregada a la antena.

Una antena **direccional** radia una potencia $P(\theta, \varphi)$ en la dirección (θ, φ) .

GANANCIA

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_t / 4\pi}$$

$$G_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_t / 4\pi}$$

En decibelios: $G = 10 \log_{10}(G)$ dBi

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

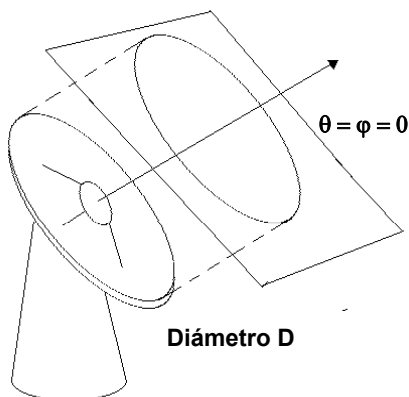
6



Apertura Efectiva

La antena capta la potencia contenida en su **Área de Apertura Efectiva** A_e .

Si la antena fuera perfecta y sin pérdidas $A_e = A = \pi D^2/4$. En la práctica:



$$A_e = \eta \cdot A$$

$$G_{\max} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \eta A}{\lambda^2} = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2$$

Donde η es la **eficiencia**. Valores típicos son entre 0.6 y 0.8.

$$\eta = \eta_s \cdot \eta_a$$

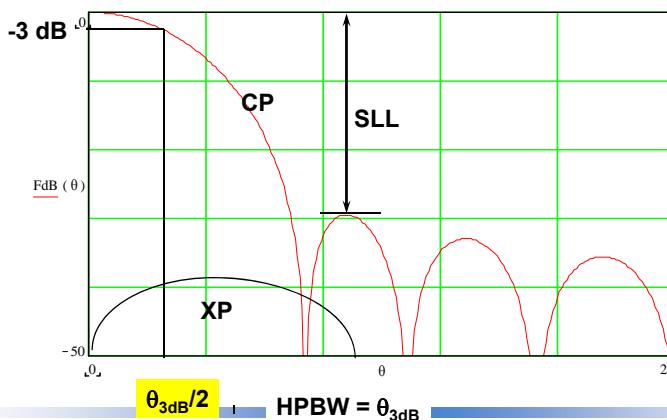
$\eta_s \equiv$ Eficiencia de spillover

$\eta_a \equiv$ Eficiencia de apertura



Características del Diagrama

- Ancho de haz a 3 dB (HPBW= θ_{3dB})
- Nivel de lóbulos secundarios (SLL)
- Nivel de polarización cruzada (XP)





Ancho de Haz y Ganancia

El ancho de haz se relaciona con las dimensiones eléctricas de apertura mediante:

$$\theta_{3\text{ dB}} \approx 70 \frac{\lambda}{D} \text{ (grados)}$$

La Ganancia en función del ancho de haz y de la eficiencia es

$$G = \eta \frac{48360}{\theta_{3\text{ dB}}^2}$$

En las proximidades del máximo la variación de la ganancia se puede aproximar como:

$$[G(\alpha)] = [G_{\max}] - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{3\text{ dB}}} \right)^2$$



Ecuaciones de Enlace

Transmisor con antena isotrópica y potencia transmitida P_T . El flujo de potencia a distancia R será:

$$F = \frac{P_T}{4\pi R^2} \text{ W/m}^2$$

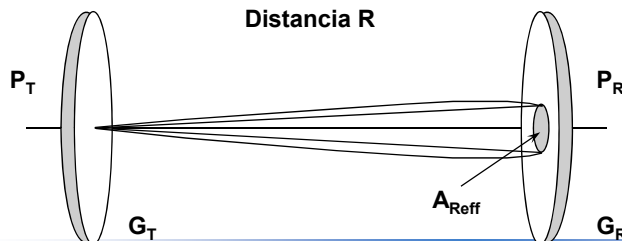
Si el transmisor tiene una antena con ganancia G_T en la dirección del receptor a distancia R el flujo de potencia que llega es:

$$F = \frac{G_T P_T}{4\pi R^2} = \frac{\text{PIRE}}{4\pi R^2}$$

El producto $P_T \times G_T$ se llama **PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente)**.

Si el área efectiva de apertura de la antena es A_e la potencia recibida es:

$$P_R = F \cdot A_e$$



CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Ecuaciones de Enlace

Teniendo en cuenta la relación entre ganancia y apertura: $A_e = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi}$

La potencia recibida será: $P_R = PIRE \cdot G_R \cdot \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right]^2$

La expresión anterior es la **fórmula de transmisión de Friis**.

El inverso del último término son las **pérdidas de espacio libre**:

$$L_p = \left[\frac{4\pi R}{\lambda} \right]^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

Por tanto, en decibelios:

$$[P_R] = [PIRE] + [G_R] - [L_p] \quad (\text{dBW})$$

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

11

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

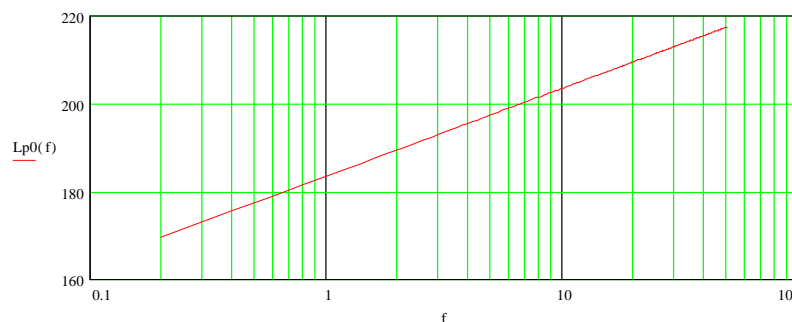


Pérdidas de Espacio Libre

Si R es la distancia estación-satélite y R_0 es la distancia del punto subsatélite al satélite GEO ($R_0 = 35\,786$ km) será:

$$L_p = \left[\frac{4\pi R}{\lambda} \right]^2 - \left[\frac{4\pi R_0}{\lambda} \right]^2 \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 = L_{p0} \left(\frac{R}{R_0} \right)^2$$

donde: $\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 = (1 - 0.295 \cos(L_{ae}) \cos(L_{oe} - L_{os}))$ \rightarrow 0 a 1.52 dB



Master I

12



Pérdidas adicionales

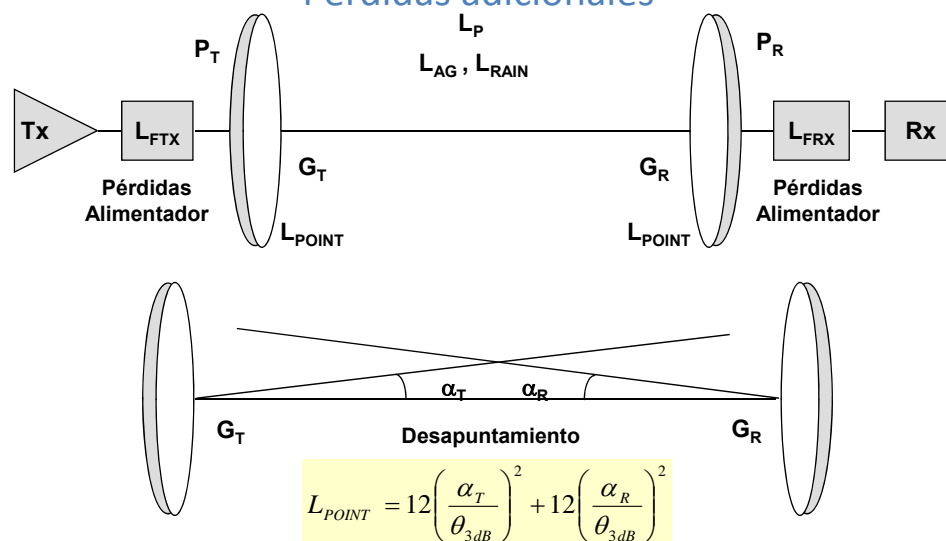
- Pérdidas entre el transmisor y antena (filtros, multiplexores, cables, guías, etc.) ($\rightarrow L_{FTX}$) y entre la antena y el receptor ($\rightarrow L_{FRX}$)
- Pérdidas por desacoplo de polarización entre las antenas del Tx y del Rx $\rightarrow L_{POL}$
- Pérdidas por desapuntamiento entre las antenas Tx y Rx $\rightarrow L_{POINT}$
- Pérdidas por absorción de los gases de la atmósfera (oxígeno y vapor de agua) $\rightarrow L_{AG}$
- Pérdidas por la atenuación de la lluvia $\rightarrow L_{RAIN}$

Por tanto, las **pérdidas adicionales totales** L_A serán:

$$[L_A] = [L_{FTX}] + [L_{FRX}] + [L_{POL}] + [L_{POINT}] + [L_{AG}] + [L_{RAIN}]$$



Pérdidas adicionales



CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Overview

3.1. Introduction to satellite communication systems

- 3.1.1. Services, frequency bands and applications
- 3.1.2. Elements of a satellite communication system
- 3.1.3. Example: ARTEMIS satellite (ESA)
- 3.1.4. Orbits

3.2 Link budget

- 3.2.1. Link equation
- 3.2.2. Atmospheric effects
- 3.2.3. Link performance estimation

3.3. Transponder Capacity Sizing**3.3. Broadband Satellite Systems**

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Pérdidas atmosféricas (ITU-R P.676)

- El contenido de oxígeno es constante a lo largo del año. Para frecuencias inferiores a 50 GHz la atenuación específica en dB/km (f en GHz) es:

$$\gamma_0 = \left[\frac{7.1}{f^2 + 0.36} + \frac{4.5}{(f - 57)^2 + 0.98} \right] \cdot f^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{dB/km})$$

- La altura equivalente en km (de un medio vertical uniforme) es: $\hat{h}_0 = 6$ (km)
- El contenido de vapor de agua varía y tiene poca correlación instantánea con la densidad en superficie. La correlación promedio en un mes o año permite una estimación a partir de la densidad promedio en superficie ρ_w :

$$\gamma_w \cong \left[0.067 + \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 7.3} \right] \cdot \rho_w \cdot f^2 \cdot 10^{-4} \quad (\text{dB/km})$$

- La altura equivalente: $h_w = 2.2 + \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 3}$ (km)

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

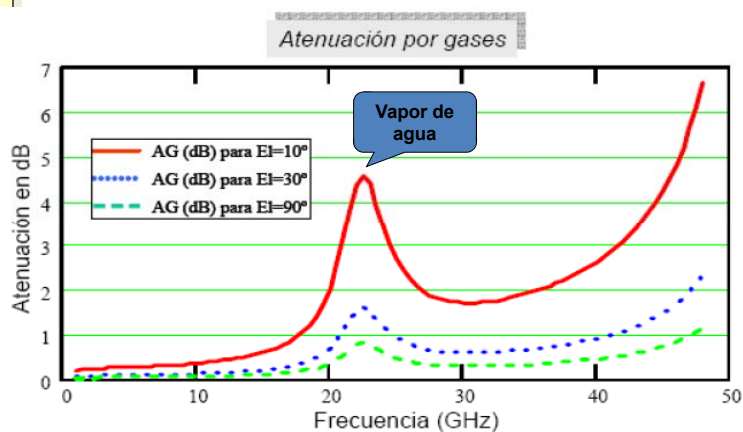


Pérdidas Atmosféricas

Si la altura de la estación terrena es h_s y el ángulo de elevación es θ , la atenuación por gases A_g es:

$$A_g = \frac{\gamma_o h_o e^{-\frac{h_s}{h_o}} + \gamma_w h}{\sin \theta}$$

(dB)



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

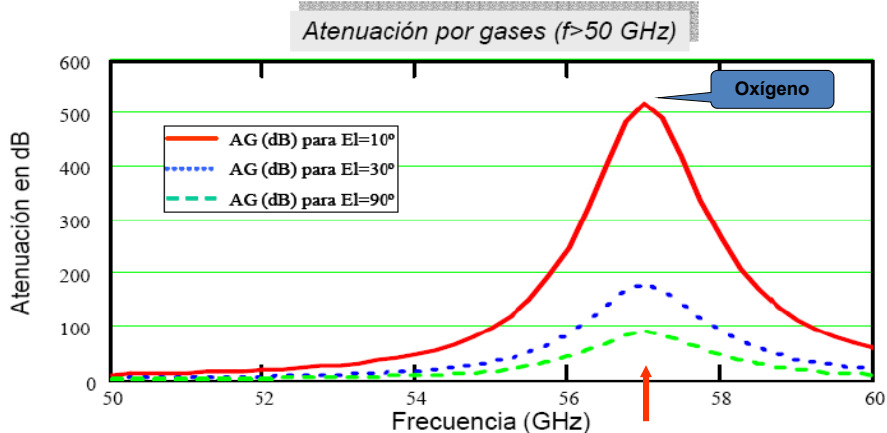
18

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Atenuación Atmosférica (Frecuencias > 50 GHz)



Esta banda en 57 GHz se usa para enlaces entre satélites, puesto que está libre de interferencias terrenas

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

19

Pérdidas por Lluvia

La atenuación producida por nubes se considera implícita en la atenuación de lluvia.

El modelo de atenuación por lluvia se basa en un modelo estadístico de las lluvias.

La atenuación específica γ_R (en dB/Km) se relaciona con la intensidad de lluvia R (en mm/h):

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (\text{dB/km})$$

$$k = \begin{cases} 4.21 \times 10^{-5} \cdot f^{2.42} & , \quad 2.9 \leq f \leq 54 \text{ GHz} \\ 4.09 \times 10^{-2} \cdot f^{0.699} & , \quad 54 \leq f \leq 180 \text{ GHz} \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.41 \cdot f^{-0.0779} & , \quad 8.5 \leq f \leq 25 \text{ GHz} \\ 2.63 \cdot f^{-0.272} & , \quad 25 \leq f \leq 164 \text{ GHz} \end{cases}$$

Intensidad de Lluvia

Estadística de Tasa de Lluvia Acumulada															
Intensidad de Lluvia Excedida (mm/h)															
Porcentaje de tiempo %	Zonas climáticas														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<0.1	0,5	0,7	2,1	0,6	1,7	3	2	8	1,5	2	4	5	12	24
0,3	0,8	2	2,8	4,5	2,4	4,5	7	4	13	4,2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	12	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170



Mapa de Zonas Climáticas (antiguo)



Master Universitario €

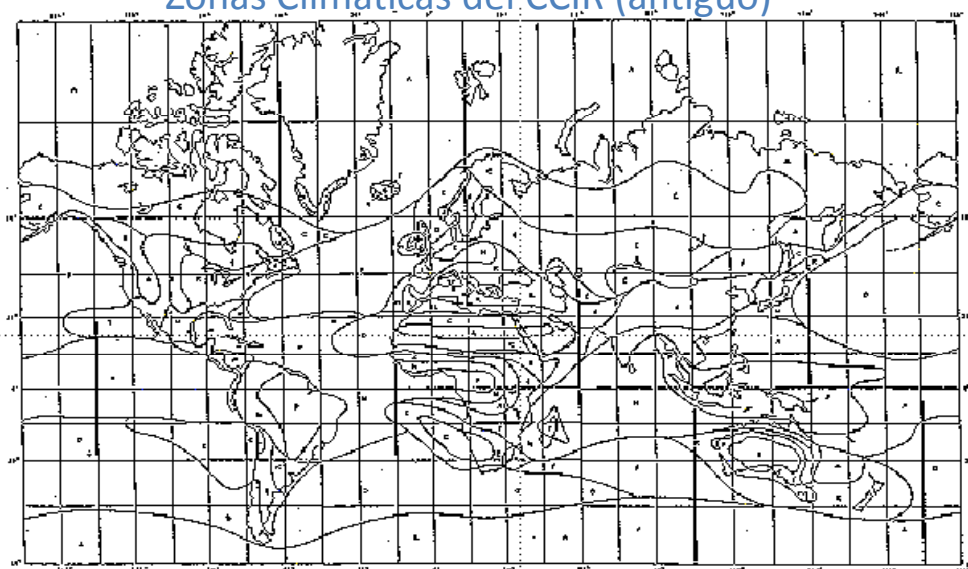
Figure 5.15 Climatic regions for Europe [MOR88].

ES

22



Zonas Climáticas del CCIR (antiguo)





Atenuación por lluvia (simplificado)

La atenuación neta en un trayecto será: $A_R = \int_0^L \gamma_R(x) dx$

Se recurre a utilizar una longitud de trayecto equivalente L_e (km) tal que:

$$A_R = k R^\alpha L_e \quad (\text{dB})$$

El método de predicción de la ITU-R se basa en la predicción de la atenuación esperada para un porcentaje anual del 0.01%.

La relación entre el porcentaje anual p y el del mes peor p_w es [Rec ITU-R P. 841]:

$$p \approx 0.29 p_w^{1.15}$$



Altura de lluvia y trayecto (simplificado)

La altura de lluvia para el 0.01% del tiempo es:

$$h_R = \rho_p(\phi) [5.1 - 2.15 \cdot \log(1 + 10^{(\phi-27)/25})]$$

Donde ϕ es la latitud geográfica de la estación y $\rho_p(\phi)$ es un factor empírico de reducción de altura:

$$\rho_p(\phi) = \begin{cases} 0.6 & \phi < 20 \\ 0.6 + 0.02(\phi - 20), & 20 \leq \phi < 40 \\ 1.0 & \phi \geq 40 \end{cases}$$

La longitud del trayecto a través de la lluvia,
Para $\theta > 5^\circ$ y $\theta < 5^\circ$ es respectivamente:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}$$

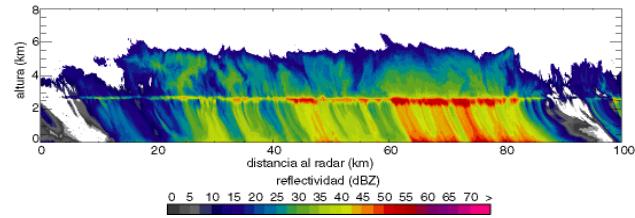
$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta}$$

$$r_p = \frac{90}{90 + 4 L_s \cos \theta}$$

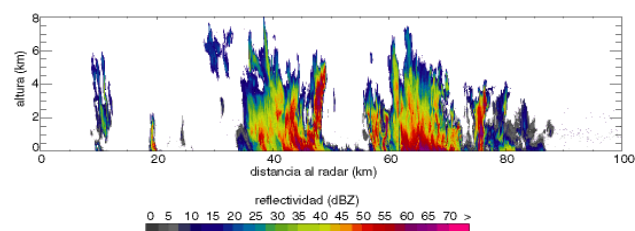
Y para tener en cuenta la no homogeneidad de la lluvia se aplica un factor:



Tipos de lluvia



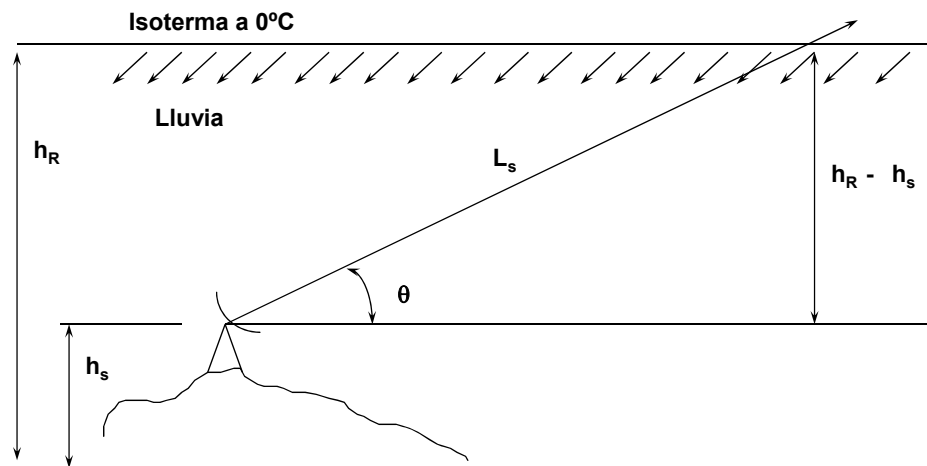
Lluvia estratiforme



Lluvia convectiva

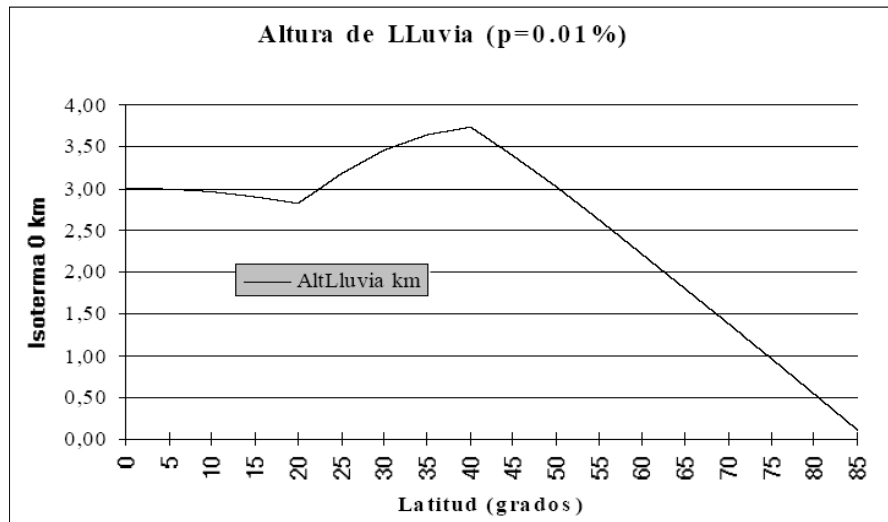


Altura de Lluvia y Trayecto





Altura de lluvia



Atenuación vs %

El valor de la atenuación excedida el 0.01% será:

$$A_{0.01} = kR^{\alpha} L_s r_p \quad (\text{dB})$$

El valor de la atenuación excedida para otro porcentaje p será:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-\beta} \quad (\text{dB})$$

$$\beta = \begin{cases} 0.33 & 0.001 \leq p \leq 0.01 \\ 0.41 & \text{para } 0.01 \leq p \leq 0.1 \\ 0.50 & 0.1 \leq p \leq 1.0 \end{cases}$$

Ruido Blanco

El **ruido blanco** es un proceso aleatorio Gaussiano de media cero y varianza:

$$\sigma^2 = N_0$$

La **densidad espectral de potencia de ruido blanco** en doble banda, entregada a una carga adaptada por una fuente de ruido a temperatura T_s , es:

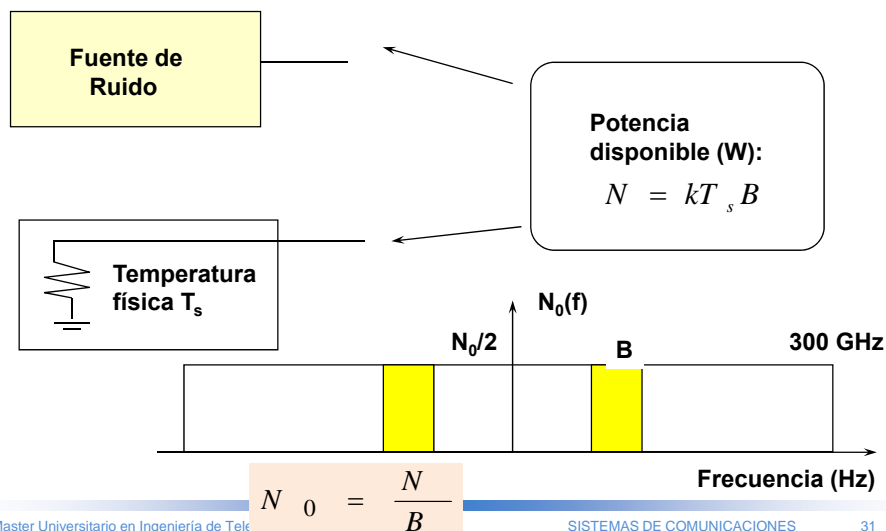
$$\frac{N_0}{2} = \frac{kT_s}{2}$$

Siendo k la **constante de Boltzman** ($10 \log_{10} k = -228.6 \text{ dBW/K/Hz}$).

La potencia entregada a una carga adaptada a través de un filtro ideal de banda B es:

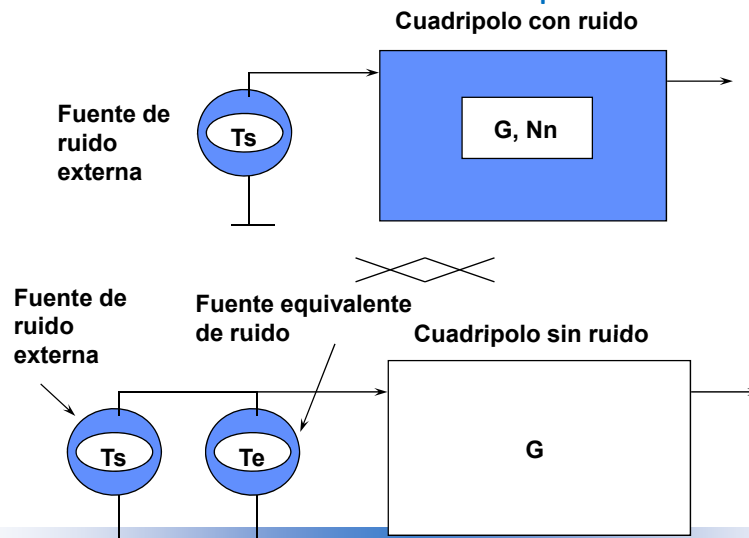
$$N = N_0 B = kT_s B \text{ Watios}$$

Temperatura de Ruido





Ruido de un Cuadripolo



Ruido de un cuadripolo

Si el cuadripolo no es ideal tendrá una ganancia G (o pérdidas $L=1/G$) y generará ruido propio. El ruido a la salida será:

$$N = G (kT_s B) + N_n$$

La ecuación anterior puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} N &= GkB \left(T_s + \frac{N_n}{GkB} \right) \\ &= GkB (T_s + T_e) \end{aligned}$$

La potencia de ruido generada por un cuadripolo puede considerarse como producida por un generador ficticio de ruido a la entrada con *temperatura equivalente de ruido*:

$$T_e = \frac{N_n}{GkB}$$



Figura de Ruido

Se define como la relación entre la potencia de ruido a la salida del cuadripolo (sistema) y la potencia de ruido que habría si el sistema no generara ruido y las fuentes de ruido estuviesen a la entrada a una temperatura de referencia T_0 de 290 K:

$$F = \frac{GkT_0B + N_n}{GkT_0B} = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

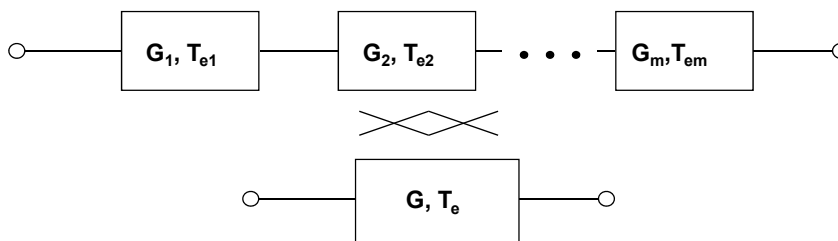
Por tanto la temperatura equivalente de ruido puede obtenerse de la figura de ruido como:

$$T_e = (F - 1)T_0$$

Para un atenuador con pérdidas L su figura de ruido es $F=L$ dB.



Cuadripolos en Cascada



$$G = G_1 G_2 \cdots G_m$$

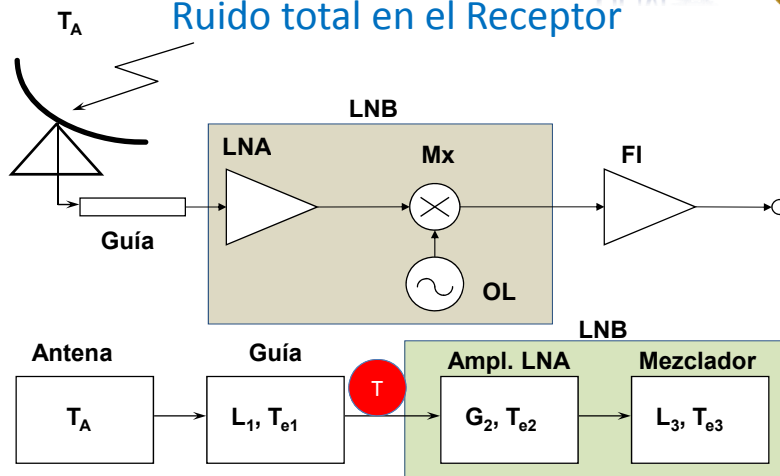
$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{T_{em}}{G_1 G_2 \cdots G_{m-1}}$$

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Ruido total en el Receptor



$$T = \frac{T_A}{L_1} + \frac{L_1 - 1}{L_1} T_0 + T_{e2} + \frac{T_{e3}}{G_2}$$

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

36

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Temperatura de Antena

La temperatura de ruido de una antena es la suma del ruido captado por la antena:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint G(\Omega) T(\Omega) d\Omega$$

Donde G es la ganancia de la antena y T la temperatura equivalente de ruido (temperatura de brillo) en la dirección del ángulo sólido elemental $d\Omega$.

FUENTES DE RUIDO:

- Ruido terrenal debido a la temperatura del suelo
- Ruido producido por el oxígeno y vapor de agua de la atmósfera
- Ruido producido por la absorción de la lluvia
- Ruido galáctico, Sol, luna, etc.
- La Tierra vista desde el satélite es una fuente de ruido

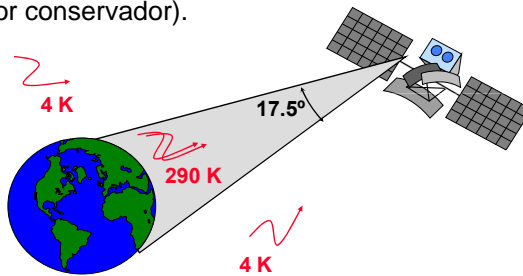
Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

37

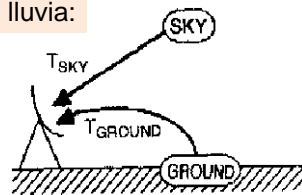
Ruido de antena en uplink

- El haz principal de la antena del satélite apunta a Tierra bajo un ángulo de visión de 17.5° .
- La Tierra es una fuente de ruido a 290 K.
- Dependiendo del ancho de haz y la zona de cobertura, el ruido de antena puede ser menor (por ejemplo, los continentes son más ruidosos que los océanos).
- $T=290$ K (valor conservador).



Ruido de antena en downlink con y sin lluvia

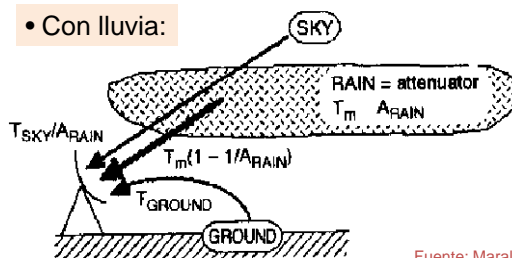
- Sin lluvia:



Fuente: Maral

$$T_{ant}^{clear\ sky} = T_{sky} + T_{ground} + T_{individual\ es}$$

- Con lluvia:



Fuente: Maral

La atenuación de lluvia afecta a las componentes de ruido procedentes del cielo, pero no a las procedentes de Tierra



Eficiencia de Haz

Para una antena con el lóbulo principal dirigido según el eje z la eficiencia de haz se define como la relación (porcentaje) de la potencia recibida dentro de un cono de ángulo θ_i respecto a la

$$\eta_B(\theta_i) = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta_i} U(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}$$

Se elige θ_i como el valor del ángulo del primer nulo (o primer mínimo) con lo que la eficiencia representa la cantidad de potencia que entra por el lóbulo respecto a la potencia total.

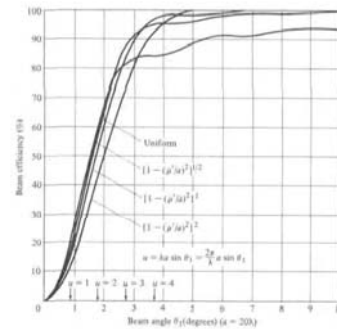


Figure 12.21 Beam efficiency versus half-cone angle θ_i , for a circular aperture with different field distributions. The aperture is not mounted on an infinite ground plane. (SOURCE: D. G. Fink (ed.), *Electronic Engineers' Handbook*, Section 1b (by W. F. Crowell), McGraw-Hill, New York, 1975)

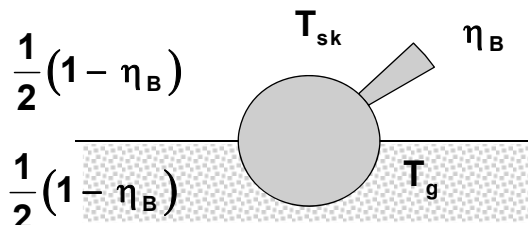


Cálculo de la Temperatura de Antena

La temperatura de antena se define como:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint G(\Omega) T(\Omega) d\Omega$$

Se puede aproximar el diagrama de antena por un haz principal, con eficiencia de haz η_B , apuntando al cielo con temperatura T_{sk} y una envolvente de lóbulos secundarios constante apuntando la mitad hacia el suelo a temperatura T_g y la aproximadamente otra mitad mirando al cielo, como se indica en la figura.



$$T_{\kappa} = \begin{cases} 290 K & , \quad El < -10^\circ \\ 150 K & , \quad -10^\circ < El < 0^\circ \\ 50 K & , \quad 0^\circ < El < 10^\circ \\ 10 K & , \quad 10^\circ < El < 90^\circ \end{cases}$$

$$T_A = \eta_B T_{sk} + \frac{1}{2}(1 - \eta_B)(T_{sk} + T_g)$$

CHAPTER 2: Satellite Systems

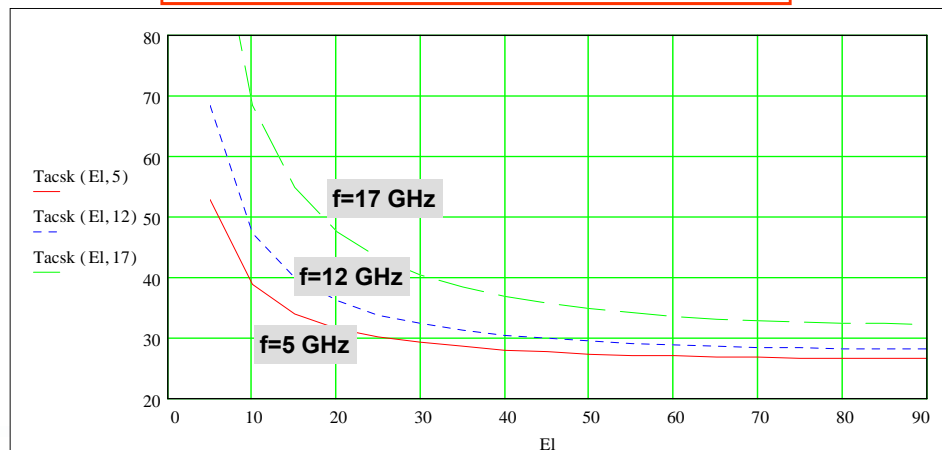
ETSIT



Temperatura de Antena en Cielo Claro

La temperatura de antena en condiciones de cielo claro será:

$$T_{Acsk} = \eta_B T_{csk} + \frac{1}{2} (1 - \eta_B) (T_{csk} + T_g)$$



CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Antenna noise (ITU-R)

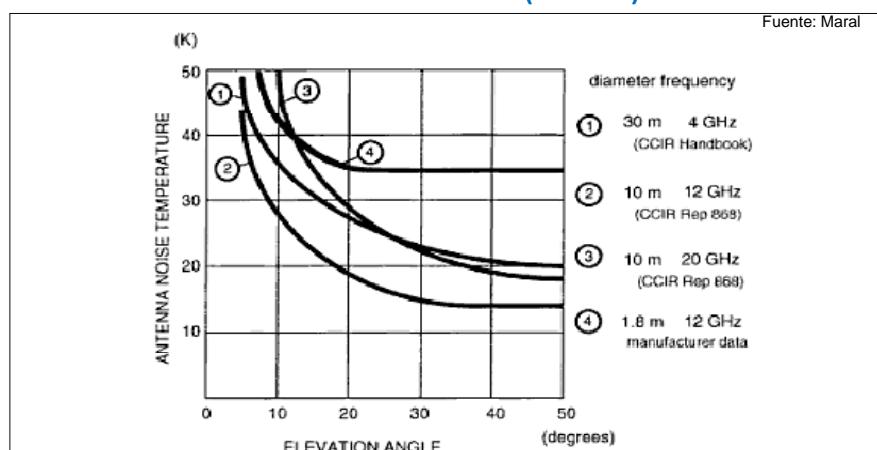


Figure 5.21 Typical values of antenna noise temperature T_A as a function of elevation angle E . Curve 1 : diameter = 30 m, frequency = 4 GHz (From [ITU-85], Reproduced by permission of the ITU). Curve 2 : diameter = 10 m, frequency = 12 GHz. Curve 3 : diameter = 10 m, frequency = 20 GHz. Curve 4 : diameter = 1.8 m, frequency = 12 GHz (Alcatel Telspace).



Relación C/N

La potencia recibida es:

$$P_R = \frac{PIRE \cdot G_R}{L_p \cdot L_A}$$

El ruido total en recepción es:

$$N = kTB_{IF}$$

Por tanto la C/N será:

$$\frac{C}{N} = \frac{PIRE \cdot G_R}{L_p \cdot L_A \cdot (kTB_{IF})} = (PIRE) \cdot \left(\frac{G_R}{T}\right) \cdot \frac{1}{L_p} \cdot \frac{1}{L_A} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{B_{IF}}$$

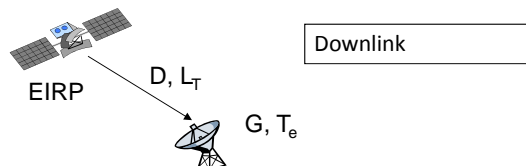
También puede caracterizarse el enlace a partir de la C/N₀:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{kT} \quad dBHz$$

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0 B_{IF}} \quad dB$$



3.2.1. Link equation

Basic link

$$C/N = EIRP + G + 20 \cdot \log(\lambda/4\pi D) - L_T - 10 \cdot \log(KTB)$$

$$C/N = (EIRP + 20 \cdot \log(\lambda/4\pi D) - L_T - 10 \cdot \log(KB)) + \mathbf{G/T}$$

Quality of the transmitter

Quality of the receiver stations

- All in dB's

G/T dB/°K

- The role of the satellite and the ground station can be exchanged to calculate the uplink.



Transpondedor Transparente

En este caso el enlace es doble y consta de un enlace ascendente con una $(C/N)_U$ y un enlace descendente con una $(C/N)_D$.

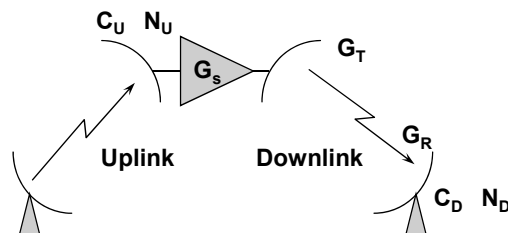
El transpondedor tiene una ganancia G_s .

La potencia de señal recibida será: $C = C_U G_s G_T G_R / L$

La potencia de ruido es: $N = N_D + N_U G_s G_T G_R / L$

Por tanto:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \frac{C}{N} = \frac{C_U G_s G_T G_R / L}{N_D + N_U G_s G_T G_R / L} = \frac{C_U}{N_U + \frac{N_D L}{G_s G_T G_R}} = \frac{1}{\left(\frac{N}{C}\right)_U + \frac{N_D L}{[(C_U G_s) G_T] G_R}}$$



Balance de Enlace Compuesto

Teniendo en cuenta que $(C_U G_s)$ es la potencia transmitida por el satélite P_T , $(C_U G_s) G_T$ será la PIRE transmitida por el satélite. Por lo tanto, $(C_U G_s) G_T G_R / L$ será la potencia recibida en el enlace descendente.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \frac{1}{\left(\frac{N}{C}\right)_U + \frac{N_D L}{[(C_U G_s) G_T] G_R}} = \frac{1}{\left(\frac{N}{C}\right)_U + \left(\frac{N}{C}\right)_D}$$

Por tanto:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_D^{-1} \quad \text{¡En unidades naturales!}$$

Y si el ruido se distribuye uniformemente en el ancho de banda B ($N = N_0 B$):

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1}$$

Factor de Calidad del Receptor

- Es la relación G_R/T la que caracteriza la calidad del receptor
- Cuanto mayor sea la ganancia de la antena, mayor calidad
- Cuanto menores sean las pérdidas entre la antena y el amplificador LNA mayor calidad
- Cuanto menor sea la temperatura de ruido del LNA, mayor calidad
 - Su ganancia debe ser grande para reducir la contribución del mezclador.
- El valor de G/T es independiente de donde se mida. Se suele tomar como referencia la entrada del LNA

Transpondedor regenerativo

- El satélite demodula, decodifica, detecta y corrige errores, modula y amplifica la señal, y la transmite a tierra (requiere *on-board processing*, OBP)
- La caracterización del enlace (en ausencia de corrección de errores a bordo) viene dada por:

$$BER_T = BER_U + BER_D$$

- **Ejemplo:** en un enlace simétrico $(E_b/N_o)_u = (E_b/N_o)_d$, un satélite regenerativo ofrece un ahorro de 2.6 dB para una $BER=10^{-4}$.
- El satélite regenerativo permite introducir el ahorro en el balance en el enlace con peores condiciones
- El efecto de la intermodulación se reduce y el HPA del satélite puede operar cerca de la saturación

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Especificaciones del Satélite

El punto de trabajo, para potencia máxima de salida, es el **punto de saturación**. Para establecer el punto de trabajo se definen los **back-off** de entrada y salida como:

$$BO_i = \frac{PIRE_{sat}}{PIRE} = \frac{F_{sat}}{F}$$

$$BO_o = \frac{PIRE_{s,sat}}{PIRE}$$

PIRE_{sat} es la PIRE que debe transmitir la estación terrena para saturar al TWTA del satélite.

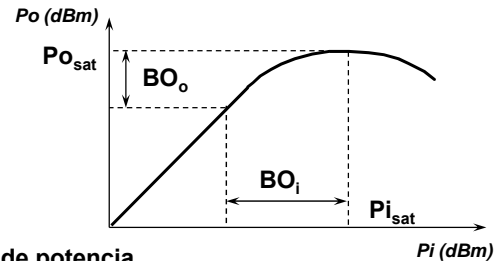
F_{sat} es la correspondiente densidad de flujo de potencia.

PIRE_{s,sat} es la PIRE producida por el satélite en saturación.

Teniendo en cuenta que: $F = PIRE / (4\pi R^2) = (PIRE \cdot 4\pi) / (L_p \lambda^2)$

$$\left[\left(\frac{C}{N} \right)_U \right] = [PIRE_{sat}] - [BO_i] - [L_U] + \left[\left(\frac{G}{T} \right)_s \right] - [k] - [B_{IF}]$$

$$\left[\left(\frac{C}{N} \right)_D \right] = [PIRE_{s,sat}] - [BO_o] - [L_D] + \left[\left(\frac{G}{T} \right)_e \right] - [k] - [B_{IF}]$$



Master Universitario

ES

50

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

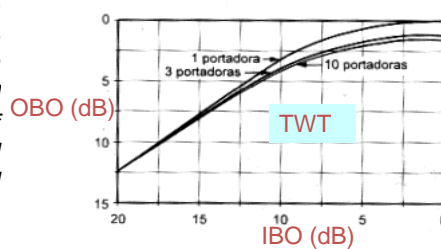


3.2.3. Link performance estimation

• Up link: $(C/N)_{ul} = PIRE_a - IBO - L - 10 \log(kB) + \frac{G_{ra}}{T_{es}}$

• Down link: $(C/N)_{dl} = PIRE_d - OBO - L - 10 \log(kB) + \frac{G_{rd}}{T_{et}}$

The EIRPs are the maximum that can be provided by the stations (for example, the 1dB compression point). IBO and OBO are the back-offs of adjustment of input and output of the on-board transmitter.



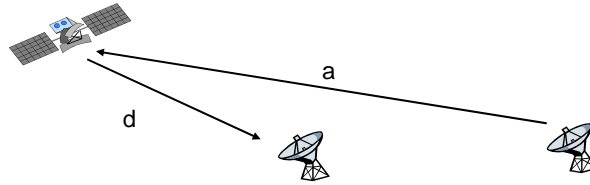
Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

57

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



- Total C/N relación:

$$(C/N)_T^{-1} = (C/N)_a^{-1} + (C/N)_{IM}^{-1} + (C/N)_d^{-1}$$

$(C/N)_{IM}$ \longrightarrow C/N degradation by intermodulation \longrightarrow Depends on IB and OB and on the interferences

For a TWT :

$$(C/N)_{IM} = k_n + 0.82 OB_i, \quad k_n = 10, 9.5 \text{ y } 8.6$$

for $n = 6, 12$ and 500 carriers, OB_i in dB's

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Modelo de Beretta

Una aproximación de la C/IM para un TWTA típico amplificando n portadoras iguales puede obtenerse de las expresiones (modelo de Beretta):

$$(C/IM)_r = 10.0 + 0.82 BO_i, \quad n = 6$$

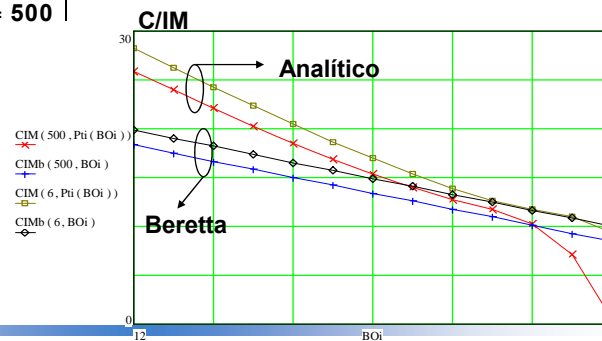
$$(C/IM)_r = 9.48 + 0.82 BO_i, \quad n = 12$$

$$(C/IM)_r = 8.60 + 0.82 BO_i, \quad n = 500$$

$$(C/IM)_r = 10.532 - 0.09n + 1.7 \times 10^{-4} n^2 + 0.82 BO_i$$

$$(C/IM)_r = 10.42759 * n^{-0.0314389} + 0.82 BO_i$$

Comparación de ambos métodos propuestos

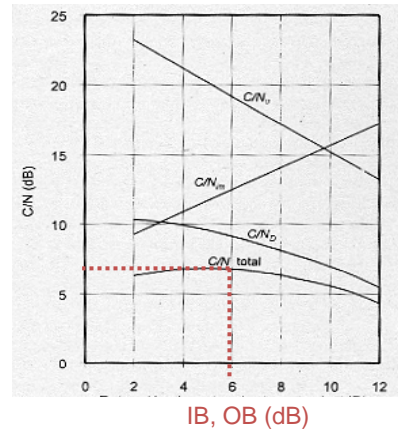


CHAPTER 2: Satellite Systems



Selection of the transmitter's work point →

Link margin:
 $(C/N)_T - (C/N)_{\text{required}}$



CHAPTER 2: Satellite Systems



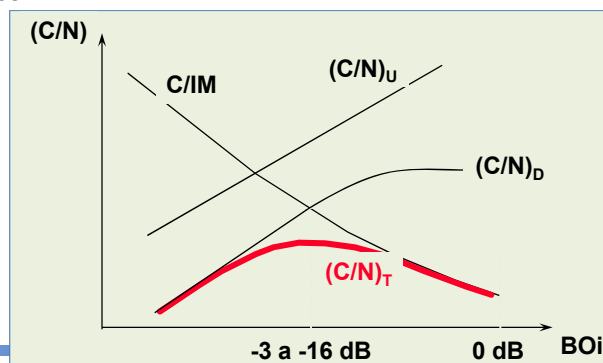
Punto de Trabajo Óptimo

Considerando el ruido de intermodulación como ruido blanco (caso peor) su contribución al balance de enlace puede tenerse en cuenta como:

$$(C/N)_T^{-1} = (C/N)_U^{-1} + (C/N)_D^{-1} + (C/IM)^{-1}$$

La variación típica de los tres términos y de la C/N total en función del punto de trabajo (BOi) del transpondedor es:

Hay un punto óptimo de operación del transpondedor que depende del número de portadoras a través de la C/IM.



Coordinación

- Las señales interferentes degradan la calidad
- Se producen interferencias entre sistemas de satélites y entre estos y sistemas terrenales
- Se hace necesario regular los niveles interferentes y coordinar entre sí los sistemas
- Si se consideran los efectos de las interferencias como ruido blanco aditivo (caso peor), y se producen con niveles $(C/I)_U$ y $(C/I)_D$ en el enlace ascendente y descendente, respectivamente, la (C/N) total puede obtenerse como:

$$(C/N)_T^{-1} = (C/N)_U^{-1} + (C/N)_D^{-1} + (C/IM)^{-1} + (C/I)_U^{-1} + (C/I)_D^{-1}$$

Interferencias generadas por las estaciones terrenas

- Se producen por la radiación a través de los lóbulos secundarios.
- La envolvente de lóbulos secundarios debe cumplir la Rec. ITU-R S-465-5 para frecuencias entre 2 y 30 GHz.

Para antenas con $D/\lambda > 100$:

$$G = \begin{cases} 32 - 25 \log \theta & 1 \leq \theta < 48 \\ -10 & 48 \leq \theta \leq 180 \end{cases} \text{ dBi para}$$

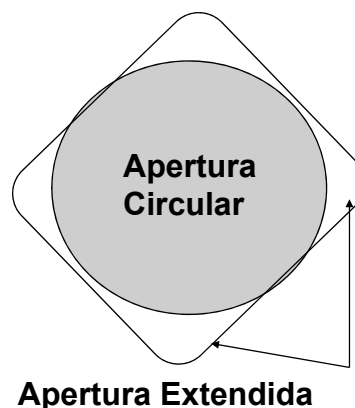
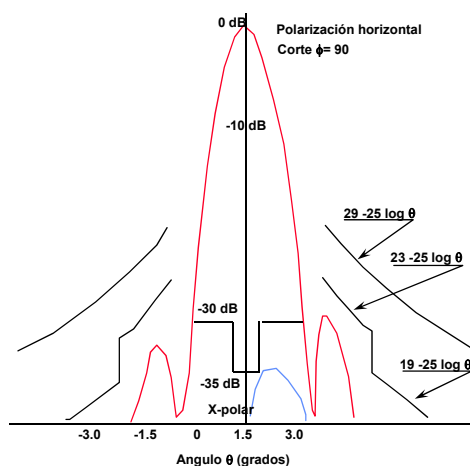
Para antenas con $D/\lambda < 100$:

$$G = \begin{cases} 52 - 10 \log(D/\lambda) - 25 \log \theta & (100\lambda/D) \leq \theta < 48 \\ 10 - 10 \log(D/\lambda) & 48 \leq \theta \leq 180 \end{cases} \text{ dBi para}$$

CHAPTER 2: Satellite Systems



Diagrama Típico de una Antena Diamond Shaped ITU-R S.580-5



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

64

CHAPTER 2: Satellite Systems



Tipos de Antenas

- Antenas de hilo (monopolos, dipolos, hélices)
 - Usadas con coberturas omnidireccionales para TTC en bandas de UHF (también se usa banda C y Ku para TTC)
- Antenas de bocina
 - Alimentadores para reflectores
 - Antenas de cobertura global ($\theta_{3dB} \sim 17.4^\circ$)
- Antenas reflectoras (simples y múltiples, centradas y descentradas -offset-)
 - Haces estrechos, múltiples, haces contorneados.
- Arrays de elementos impresos, ranuras o bocinas
- Reflectarrays
- Otras: antenas activas, lentes, reflectores dieléctricos, despun antennas, inflables, etc.

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

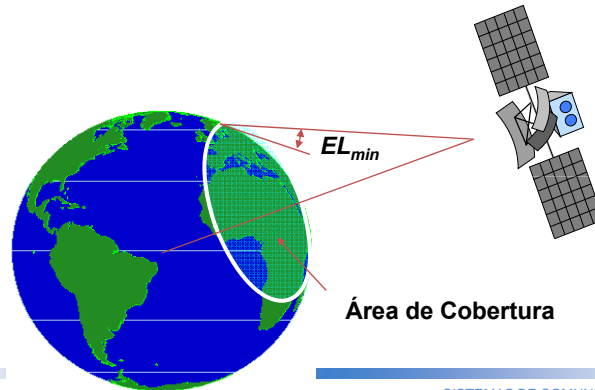
SISTEMAS DE COMUNICACIONES

76

Cobertura

Se denomina **área de cobertura de un satélite** al área de la superficie de la Tierra desde la que un satélite se ve con un ángulo de elevación EL igual o mayor que un **ángulo de elevación mínima EL_{min}** dado.

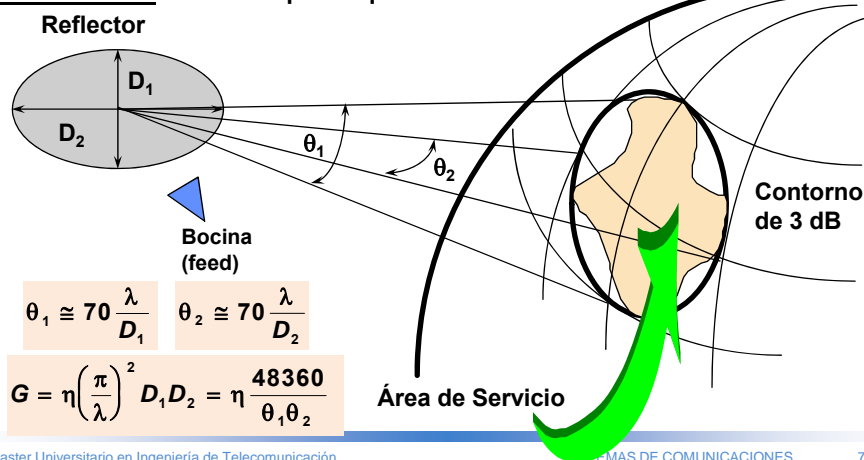
La geometría del **área de cobertura** es un casquete de la superficie esférica de la Tierra que viene determinado por el ángulo de elevación mínima.



Cobertura Elíptica

Cobertura de la antena: zona intersectada por el haz a -3 dB

Área de Servicio: zona a la que se quiere dar servicio



CHAPTER 2: Satellite Systems



Es mejor tomar el ángulo central de cobertura γ como parámetro en lugar del ángulo de elevación porque es independiente de la altura de los satélites. Ambos están relacionados mediante:

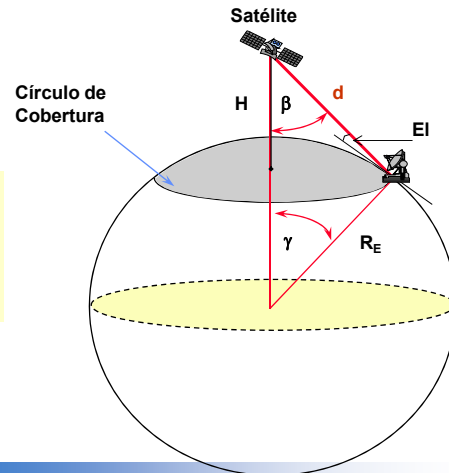
$$\frac{\sin \beta}{R_E} = \frac{\sin(\pi/2 + El)}{R_E + H} = \frac{\cos(El)}{R_E + H}$$

$$\beta = \arcsen\left(\frac{R_E}{R_E + H} \cos(El)\right)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta - El = \frac{\pi}{2} - \arcsen\left[\frac{R_E}{R_E + H} \cos El\right] - El$$

$$= \arccos\left[\frac{R_E}{R_E + H} \cos El\right] - El$$

$$El = \arctan\left(\frac{\cos \gamma - \frac{R_E}{R_E + H}}{\sin \gamma}\right)$$



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

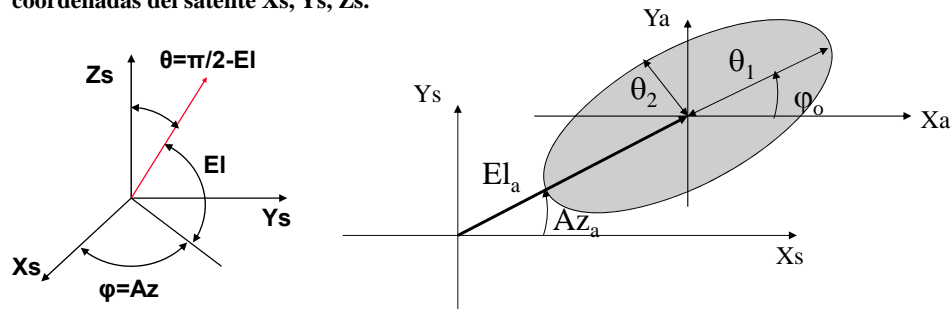
SISTEMAS DE COMUNICACIONES

80

CHAPTER 2: Satellite Systems



La dirección de apuntamiento de la antena es (Az_a, El_a) respecto a un sistema de coordenadas del satélite X_s, Y_s, Z_s .



Aproximamos el seno al ángulo para valores pequeños del mismo.

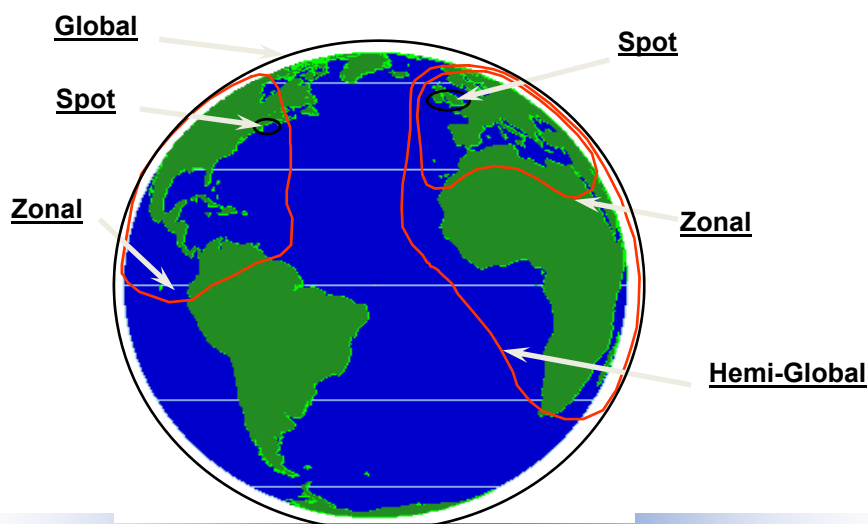
La ganancia de la antena varía con θ , en cada dirección ϕ , según la aproximación parabólica:

$$Gt(\theta) = Gt_{\max} - 3\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2$$

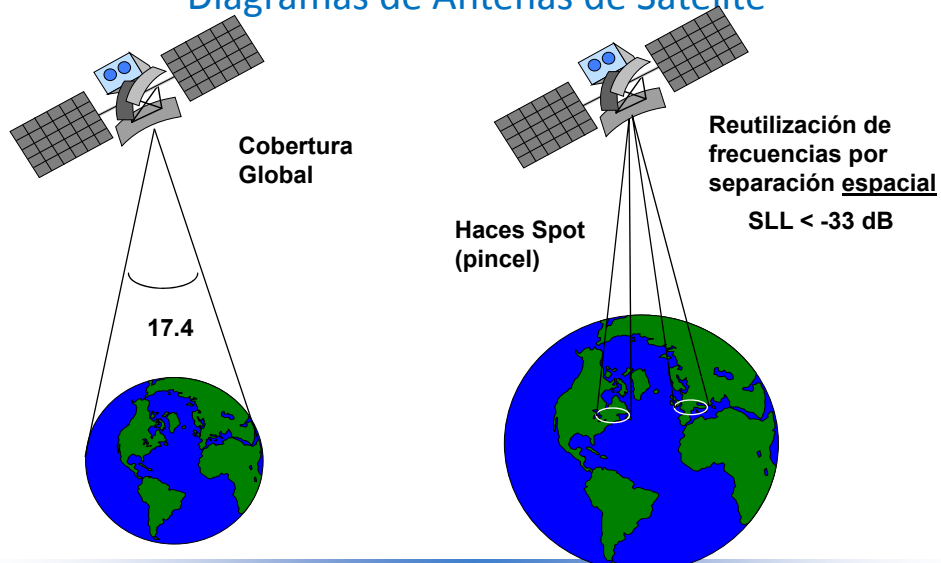
θ_{3dB} es el semiancho de haz a -3 dB en la dirección ϕ considerada.



Coberturas Típicas de INTELSAT V



Diagramas de Antenas de Satélite



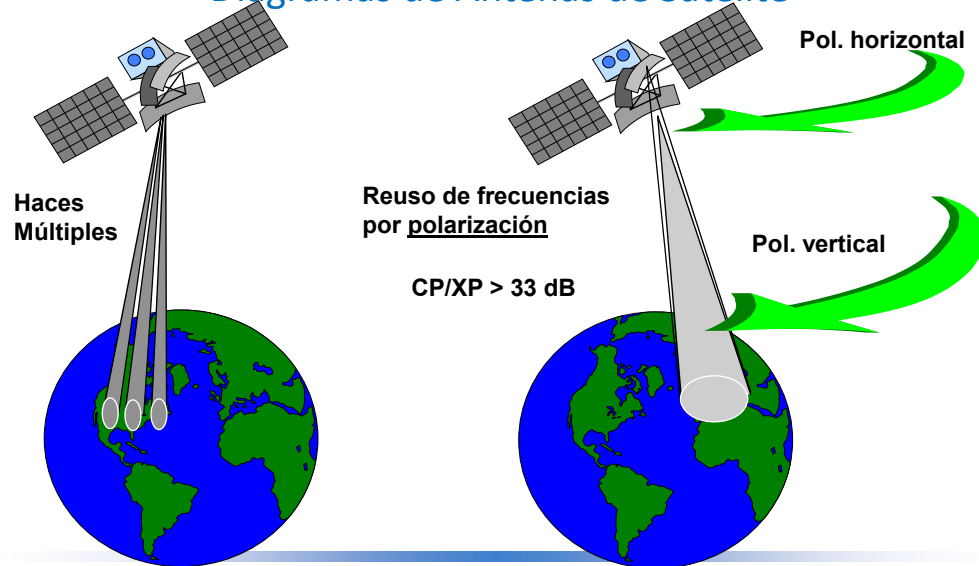
CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

UPM



Diagramas de Antenas de Satélite



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

84

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

UPM



Mapas de PIRE

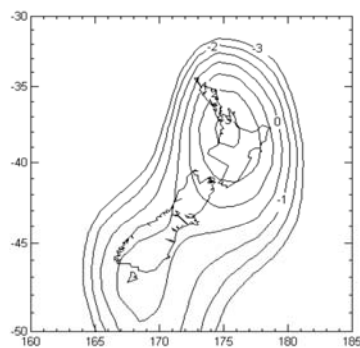


Figure A1.1.3 New Zealand Beam Receive G/T (dB/K) B-Series Satellite

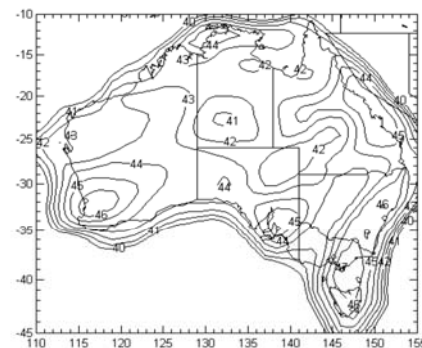


Figure A1.3.3 National Beam Radiated EIRP (dBW) B-Series Full Transponder

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

85

CHAPTER 2: Satellite Systems



Mapas de Intensidad de Lluvia

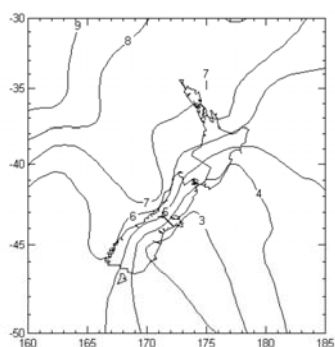


Figure A4.3.3 NZ Downlink Annual Attenuation (dB) Exceeded for 0.01% of the Year

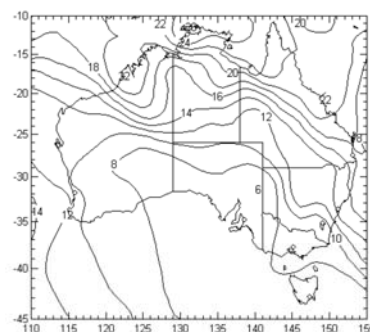


Figure A4.2.3 Australia, Downlink Worst Month Attenuation (dB) Exceeded for 0.01% of Worst Month

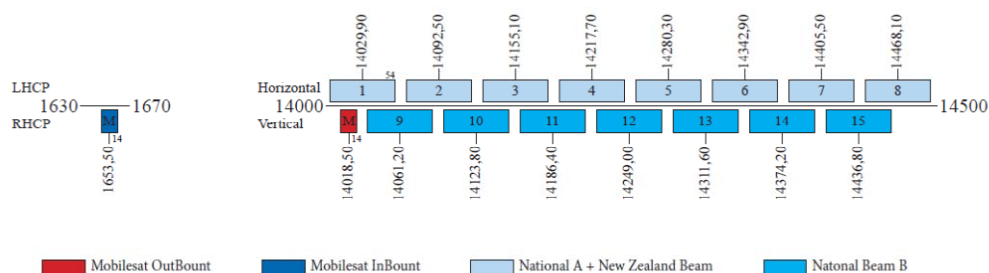
CHAPTER 2: Satellite Systems



Plan de Frecuencias UL

Optus B
Frequency Plan

Uplink

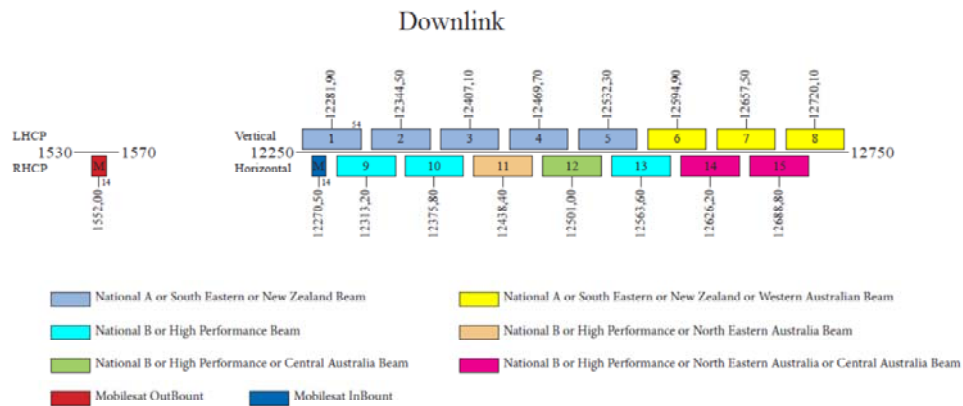


CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Plan de Frecuencias DL



Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

88

CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT



Banda C
4 GHz

40000 km

Ta=50°K
T_{LNA}=20°K
η=65%

Pt=8 dBW
G_{borde}=16 dBi
BO_o=3 dB

Flujo = $\frac{PIRE}{4\pi R^2}$

$$= 8 + 16 - 10\log(4\pi) - 20\log(4 \cdot 10^7)$$

$$= -139 \text{ dBW / m}^2$$

$\left(\frac{C}{N}\right) = (11 \text{ dB umbral}) + (7 \text{ dB Margen} \{C \downarrow 3, N \uparrow 3\}) = 18 \text{ dB}$

$N = kT_s B = -228.6 + 10\log(20 + 50) + 10\log(36 \cdot 10^6) = -134.6 \text{ dBW}$

$[C] = [(C/N)] + [N] = [\text{Flujo}] + [\eta A_r]$

$[\eta A_r] = 18 + (-134.6) - (-139 - 3) = 25.4 \text{ dBm}^2$ **$A_r = 10^{\frac{25.4 - 10\log(0.65)}{10}} = 533.4 \text{ m}^2 \Rightarrow D = 26 \text{ m}$**

$[(G/T)] = 10\log(0.65) + 20\log(\pi \frac{D}{\lambda}) - 10\log(70) = 40.5 \text{ dBK}^{-1}$

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

89

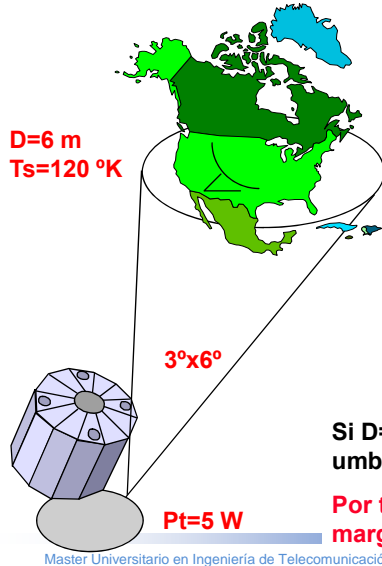
CHAPTER 2: Satellite Systems

ETSIT

UPM



Balance de Enlace. Ejemplo 2



$$G_s = 10 \log \left(0.62 \frac{48360}{3 \times 6} \right) = 32 \text{ dBi}$$

$$G_{\text{borde}} = 32 - 3 = 29 \text{ dBi}$$

$$G_e = 10 \log(0.65) + 20 \log \left(\frac{\pi \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ GHz}}{0.3} \right) = 46 \text{ dBi}$$

$$(G/T)_e = 46 - 10 \log(120) = 24.8 \text{ dBK}^{-1}$$

$$(C/N) = (10 \log 5 + 29) + 24.8 - 20 \log \left(\frac{4\pi R(m)f(\text{GHz})}{0.3} \right)$$

$$-(-228.6 + 10 \log(36 \cdot 10^6)) = 17.3 \text{ dB}$$

$$\text{Margen} = 17.3 - 11 = 6.3 \text{ dB}$$

Si D=3 m $\Rightarrow G_e \downarrow$ dB y Margen \downarrow dB. Si extendemos umbral a 8.5 dB \Rightarrow Margen \uparrow 5 dB

Por tanto, pueden usarse antenas de 3 m con un margen de $(6.3+2.5) - 6 = 2.8 \text{ dB}$.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

90

CHAPTER 2: Satellite Systems

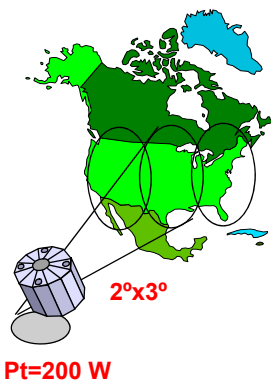
ETSIT

UPM



Ejemplo 3: DBS (Direct Broadcast Satellite)

DOWN-LINK DBS



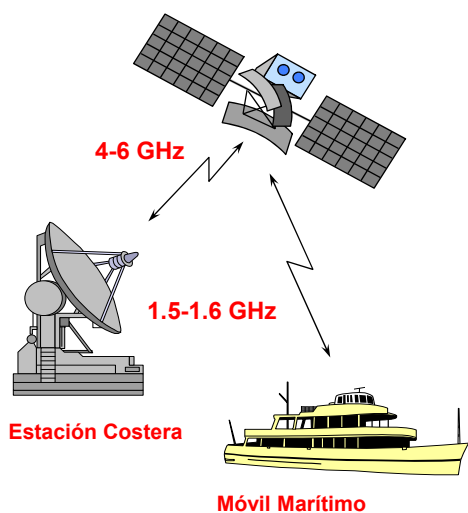
Satélite		Potencia de Ruido	
Potencia transmitida por canal (W)	200	Constante de Boltzman (DBW/K/Hz)	-228,6
Frecuencia (GHz)*	12,2	Temp.Ruido Sistema (700K) dBK	28,45
Ancho de Haz Horizontal (grad)	2	Ancho de Banda (27 MHz) (dBHz)	74,31
Ancho de Haz Vertical (grad)	3	Potencia de Ruido N (dBW)	-125,84
Ganancia (62% eficiencia) (dBi)	36,99	Balance de Enlace	
Distancia media Est.T.-Sat. (km)	38000	C/N (dB)	10,89
Elevación mínima (grad)	9	Márgen (sobre umbral 9 dB) (dB)	1,89
Pérd. Atmosf. cielo claro (dB)	0,48	Calidad Estación Receptora G/T	
Densidad de Flujo (dBW/m2)	-103,07	Ganancia antena (dBi)	36,81
Estación Receptora		G/T (dBK-1)	8,36
Diámetro de antena (m)	0,7		
Eficiencia (%)	60		
Area Efectiva (m2)	0,23		
Potencia Recibida (FxAe) dBW	-109,44		
Pérdidas			
Estación Borde Cobertura (dB)	-3		
Desacoplo Polarización (dB)	-0,5		
Error Apuntamiento (dB)	-1		
Pérdidas Alimentador (dB)	-1		
Potencia Recibida C (dBW)	-114,94		

Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación.

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

91

Ejemplo 4: Sistema INMARSAT



CANAL VOZ INMARSAT

Downlink Satélite-Barco

Banda de Frecuencias (MHz)	1535-1543.5
Ancho de Banda RF ocupado (MHz)	2
Número de Canales	40
Ancho de Banda RF por canal (kHz)	30
Potencia salida transpondedor (W)	10
Potencia por canal (dBW)	-6,02
G Ant.Satélite Borde Cobertura (dBi)	17
Pérd. Espacio Libre (38000 km) (dB)	187,8
G/T Est.Receptora (dBK-1)	-4
Ancho de Banda de ruido (kHz)	20

C/N (dB) 4,8

Uplink Barco-Satélite

Banda de Frecuencias (MHz)	1636.5-1645
PIRE Barco (10W 2m diam) (dBW)	37,0
Pérd. Espacio Libre (38000 km) (dB)	188,3
G Ant.Satélite Borde Cobertura (dBi)	16
Temp.ruido sistema Transp (500K) (dBK)	27,0
G/T satélite (dBK-1)	-8,0
C/N por canal (dB)	21,5

Question 2.4

In Mobile Satellite Services (MSS), the frequency bands most commonly used in the downlinks are:... ????

ANSWER 1: Ku and Ka.

ANSWER 2: C and X.

ANSWER 3: C, Ku and Ka

ANSWER 4 : L and S.

CHAPTER 2: Satellite Systems



Question 2.5

In a communication satellite, the received signal is changed in frequency, amplified and flexibly transmitted by switching to one of the beams available in the down link. The on-board processor of the satellite is:... ????

ANSWER 1: A regenerative processor.

ANSWER 2: A transparent processor.

ANSWER 3: A transparent transponder.

ANSWER 4 : None of the above.

CHAPTER 2: Satellite Systems



Question 2.6

A satellite link implemented with a transparent transponder has been designed in a way that the degradation of the signal produced by the down link is the same as that produced by the intermodulation of the transmitter.

Knowing that the signal degradation of the uplink is negligible, what will be the C/N of the link if the user terminal (down link) increases the G/T by 20dB...?????

ANSWER 1: Approximately 6 dB higher than the initial one.

ANSWER 2: Approximately 3 dB higher than the initial one.

ANSWER 3: Approximately 6 dB lower than the initial one.

ANSWER 4 : None of the above.